

## CANDU 노심에서의 교체 핵연료 선정 시스템 개발

### Development of the Channel Selection System for Refueling in an Existing CANDU Core

윤문영, 권오환, 염충섭  
고등기술연구원  
경기도 용인시 백암면 고안리 633-2  
서형범, 이성덕  
(주)한국수력원자력  
경북 경주시 양남면 나아리 260

#### 요 약

노심관리의 효율성, 안전성을 고려하여 교체 핵연료를 선정하고 그 적합성을 평가하는 것은 매우 중요하고 어려운 절차이다. 본 연구는 월성 1호기를 대상으로 하여 교체 핵연료 선정 과정에 일정한 규칙과 절차를 도입하여 교체 핵연료 선정 시스템을 구성함으로써 보다 효율적이고 체계적으로 원전을 운영할 목적으로 수행되었다. 개발된 교체 핵연료 선정 시스템은 사용자에게 의해 정의된 교체 핵연료 선정 규칙을 이용하여 교체 핵연료 집합을 선정하고 이를 UI로 제공한다. 사용자는 선정된 교체 핵연료들을 검증하기 위해 pre-simulation을 수행하고 그 결과를 조회할 수 있으며, 원자로의 특성에 맞도록 교체 핵연료 선정 규칙을 조절할 수 있다. 교체 핵연료 선정 시스템을 검증하기 위하여 실험 결과를 월성 1호기의 실제 교체내역과 비교하고, 핵연료 교체 pre-simulation을 연속적으로 수행한 결과 핵연료 교체에 따른 반응도 효과에 대한 평가규칙 및 가중치의 조정이 필요한 것으로 판단되었다. 향후 개발한 시스템을 기반으로 현장 경험치를 지속적으로 활용하여 노심 운전에 적용하면 보다 효율적인 노심관리가 가능할 것이다.

#### Abstract

It is very important and difficult procedure to select suitable channels to be refueled and to evaluate the suitability in consideration of efficiency as well as safety in core management. This study was performed to develop a channel selection system for the purpose of supporting more efficient and systematic core management by introducing regular rules and procedures in the Wolsong NPP unit 1. The system can select some channel sets for refueling using user-defined individual and sequential evaluation rules

and show the results in GUI environment. Also, the system can perform a pre-simulation for convincing users of validity of the results and provide users with interfaces being able to control the evaluation rules. By comparing the results with the history data of the Wolsong NPP unit 1 and results of continuous pre-simulation, we could see the evaluation rule and the weighting values related with the reactivity of the system should be tuned. It is expected that more efficient core management would be possible by making the best use of the long-time field experience and history, and then applying those to the system continuously.

## 1. 서론

중수형 원전은 경수형 원전과 달리 운전 중에 핵연료를 교체하는 특성이 있다. 우리나라의 대표적인 중수형 원전인 월성 1호기(CANDU-6)의 경우 매일 3-4개씩의 핵연료가 운전 중에 교체되고 있다. 노심의 상태를 정확히 파악하고, 이에 근거하여 최적의 교체 대상 핵연료를 선정하는 과정은 노심관리 엔지니어의 주요 업무 중 하나이다. 그러나 원전 운영의 경제성 및 안정성, 운영기술지침서 상의 제반 사항 만족 여부 등 각종 정보들을 고려하여 최적의 교체 핵연료를 선정하는 것은 쉬운 일이 아니며, 상당 부분 노심 관리 엔지니어의 경험 및 개인적인 성향에 의존하는 경향이 있다.

이와 같은 교체 핵연료 선정 과정에 대한 객관적인 규칙을 수립하고, 이에 근거하여 교체 핵연료를 선정하고자 하는 움직임은 H. Choi, A.S. Gray[1,2]의 연구에서 찾아볼 수 있다. 대표적으로 D. Brissette[3]은 CANDU-6형의 원자로 G-2에 적용할 교체 핵연료 선정 기준을 제시한 바 있다. 본 논문의 제 2장에서는 수립된 교체 핵연료 선정 규칙 및 이를 구현한 교체 핵연료 선정 시스템에 관하여 설명하고, 제 3장에서는 개발된 교체 핵연료 선정 시스템을 월성 1호기에 적용한 결과를 제시하였다.

## 2. 본론

### 2.1 교체 핵연료 선정 규칙

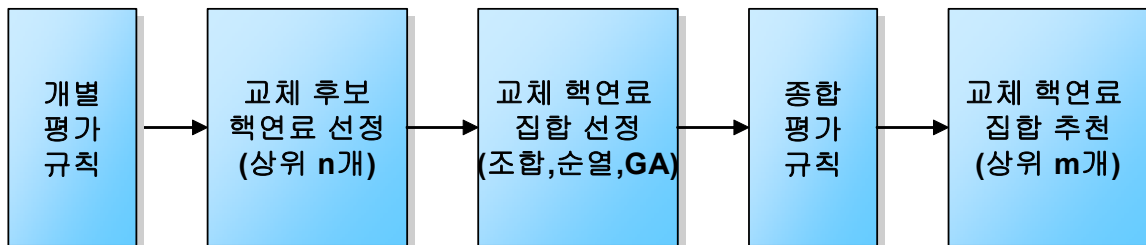
교체 핵연료 선정 과정은 크게 개별 평가 및 종합 평가, 두 가지로 나뉜다. 개별 평가에서는 380개의 핵연료 각각에 대해 평가 항목들을 지정하고, 각 항목별로 개별 평가 규칙(Individual Evaluation Rules)에 따라 점수를 부여한다. 최종적인 개별 핵연료의 평가 점수는 각 평가 항목에서 얻은 점수들의 제곱합의 음의 제곱근으로 계산된다. 종합 평가에서는 교체하고자 하는 핵연료의 개수만큼 뽑아 교체 핵연료 집합을 만든 뒤, 이 교체 핵연료 집합에 대하여 평가 항목들을 지정하고, 각 항목별로 종합 평가 규칙(Sequential Evaluation Rules)에 따라 점수를 부여한다. 각 교체 핵연료 집합에 대한 최종적인 평가 점수는 개별 평가에서와 같은 방법으로 구한다.

평가 점수는 일종의 별점으로서 각 항목별로 교체에 적절치 않은 사항들이 추가될 때마다 음의 점수를 매긴다. 즉 각 항목별로 교체에 적절한 범위를 설정하고 그에 벗어나는 핵연료 또는 핵연료 집합에는 정도에 따라 가중치를 두어 음의 점수를 부여하는 방식이다. [표 1]은 개별 평가 및 종합 평가의 항목 및 각 항목에 따른 정상 범위, 즉 음의 점수를 받지 않는 범위를 나타낸 것이다.

[표 1] 평가 항목 및 정상 범위

규칙 이름	평가 항목	정상 범위
개별 평가 규칙 #1	Average exit burnup of a channel	100%TA 이상
개별 평가 규칙 #2	Burnup spacing of a channel in a cluster	8%TA 이상
개별 평가 규칙 #3	Cluster average exit burnup difference with core average	-2% TA 이상
개별 평가 규칙 #4	Maximum channel overpower in the neighborhood	102 이하
개별 평가 규칙 #5	Minimum channel power margin in the neighborhood	6% 이하
개별 평가 규칙 #6	Axial balance of channel refuelings	2개 이하
종합 평가 규칙 #1	Absolute level of LZC <sub>i</sub>	20%~70% 사이
종합 평가 규칙 #2	Relative level of LZC <sub>i</sub>	-10%~10% 사이
종합 평가 규칙 #3	Average refueling reactivity	0.2mk 이상
종합 평가 규칙 #4	Exit burnup of selected channels	100%TA 이상
종합 평가 규칙 #5	Number of refueling side changes	0회

교체 핵연료 집합을 뽑아내는 방법에는 조합, 순열, GA가 있다. 어느 방법을 사용하든 간에 380개의 핵연료 중에서 교체하고자 하는 핵연료의 개수만큼을 뽑아내는 것은 많은 시간을 필요로 하므로 교체 대상 핵연료를 제한할 필요가 있다. 따라서 개별 평가 점수가 높은 순서대로 교체 후보 핵연료들을 선정하고(상위 n개), 이 중에서 교체하고자 하는 핵연료 개수(r개)만큼을 뽑아내어 교체 핵연료 집합을 선정한다. n개의 교체 후보 핵연료들에서 r개의 교체 핵연료들을 뽑아내어 교체 핵연료 집합을 선정하는 방법으로 가장 일반적인 것이 ‘조합’이다. 그러나 엄밀히 말하자면 교체 핵연료 집합으로 선정된 개개의 핵연료 뿐 아니라 핵연료들의 교체 순서 역시 종합 평가 규칙의 적용에 중요한 영향을 미친다. 즉 교체 핵연료 집합이 같은 핵연료들로 구성된다 하더라도 그 순서가 달라지면 종합 평가 점수가 달라진다. 이는 핵연료 교체 순서가 교체 방향 변환 횟수를 고려하여 벌점을 가하는 종합 평가 규칙 #5번에 특히 영향을 미치기 때문이다. 따라서 n개의 교체 후보 핵연료들에서 r개의 교체 핵연료들을 추출할 때 순서를 고려하는 ‘순열’을 사용하였다. 교체 핵연료 집합 추출 과정을 순열로 하면 조합에 비하여 정확한 결과를 얻을 수는 있으나 교체 핵연료 개수가 늘어날수록 수행 시간이 길어지는 단점이 있다. 테스트 결과 2-3개의 교체에 관하여는 수행 시간이 비슷하나, 교체 핵연료 개수가 5개 이상으로 넘어가면 수행 시간이 3분 이상으로 늘어나 현장에서 실제 사용하기에 무리가 따른다. 이러한 상황을 보완하기 위하여 교체 후보 핵연료들에서 교체 핵연료 집합을 뽑아내는 방법으로 GA(Genetic Algorithm, 유전 알고리즘)를 도입하였다. 이와 같은 방법으로 선정된 교체 핵연료 집합들은 종합 평가 과정을 거쳐 순위가 매겨지고, 그 중 상위(m개)에 속하는 것들은 사용자에게 교체 핵연료로 추천된다.([그림 1] 참조)



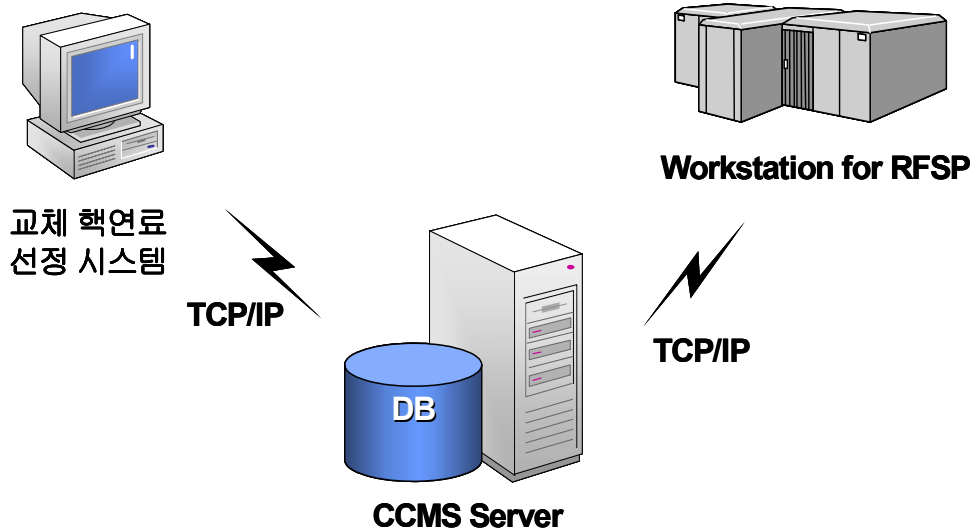
[그림 1] 교체 핵연료 선정 과정

## 2.2 교체 핵연료 선정 시스템

이 같은 교체 핵연료 선정 규칙을 내부 알고리즘으로 가지고 UI환경 및 사용자 인터페이스를 제공하는 교체 핵연료 선정 시스템을 구성하였다. 교체 핵연료 선정 시스템은 이전 연구[4]에서 구축된 CANDU 노심 감시 시스템(CCMS, CANDU Core Monitoring System)과 연계하여 구성되었다.([그림 2] 참조) 교체 핵연료 선정 규칙 등 내부 알고리즘은 사용자 PC에서 수행되며, 이에 필요한 노심 관련 주요 데이터는 CCMS의 데이터베이스를 활용한다. CCMS는 실시간 노심 감시를 통해 노내 정보를 1,2분 단위로 저장하고 있으므로, 사용자가 필요로 하는 정보를 언제든지 제공할 수 있다.

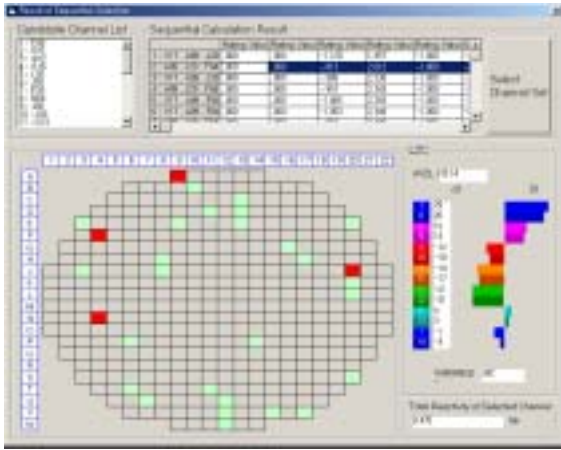
교체 핵연료 선정 시스템의 주요 기능은 교체 핵연료 선정 규칙을 적용하여 현재 상태에서 가장 좋은 교체 핵연료 집합들을 선정하고 이를 사용자에게 UI로 제공하는 것이다. 이 때에는 교체 핵연료 집합뿐만 아니라 해당 핵연료들을 교체하였을 때 예상되는 LZC 수위 변화량 및 K-increase 값 등 사용자가 관심 있게 보는 정보들도 함께 제공된다. 그 외 사용자가 지정해야 할 각종 변수들은 UI를 통해 입력받도록 설계하였다. 또한 교체 핵연료 선정 규칙의 개별 평가 규칙 및 종합 평가 규칙에서 사용되는 가중치는 같은 중수형 원전이라 하더라도 개개 원자로의 상황에 따라 다르게 적용될 필요가 있으므로 사용자 설정에 의해 이를 변경할 수 있도록 구성하였다.

교체 핵연료 선정 시스템은 교체 핵연료를 선정하는 주요 기능 외에도 pre-simulation 수행과 같은 부가 기능을 지원한다. Pre-simulation은 선정된 교체 핵연료들을 교체하였을 때 나타나는 결과가 운영기술지침서 상의 최대출력 제한치를 초과하는지 여부를 검증하기 위해 RFSP 코드를 미리 수행하는 것으로, 월성 1호기에서는 이 같은 작업이 수동으로 진행되고 있다. 교체 핵연료 선정 시스템은 CCMS Server Program의 RFSP 수행 모듈을 이용하여 pre-simulation을 수행하고 그 결과를 사용자에게 제시한다.([그림 2] 참조)



[그림 2] 교체 핵연료 선정 시스템 아키텍처

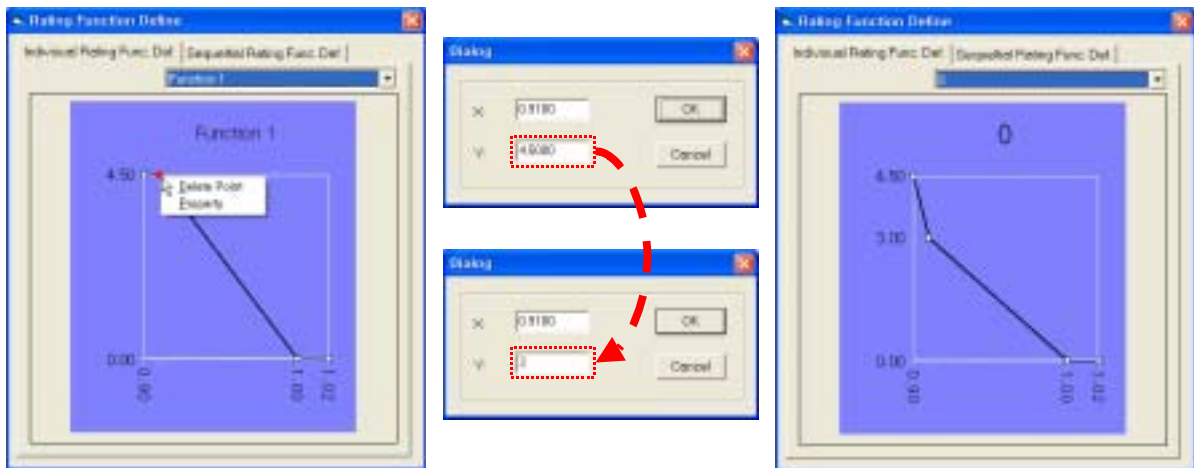
[그림 3]은 교체 핵연료 선정 시스템의 결과를 나타내는 화면이다. 화면 상단에는 교체 핵연료 집합이 리스트로 나열되어 있으며, 화면 하단에는 해당 교체 핵연료들이 CANDU 원자로의 power map 상에 나타나 있는 것을 알 수 있다. Power map에서 짙게 나타난 것이 교체 핵연료들이며, 옅은 색으로 구분된 것은 교체 후보 핵연료들이다. 화면의 우측 하단에는 예상되는 LZC 수위 변화량 및 K-increase 값이 나타나 있다. [그림 4]는 pre-simulation 수행 결과를 나타내는 화면으로서, 이전 연구[4]에서 구축한 CANDU 노심 감시시스템의 클라이언트 프로그램과 화면 설계가 동일하다. [그림 5]는 개별 평가 규칙 및 종합 평가 규칙에서 사용되는 가중치를 조절할 수 있는 화면이다. 변경하고자 하는 항목을 선택하면 현재 사용되고 있는 가중치 함수가 나타나는데 마우스 클릭을 통해 이를 손쉽게 변경할 수 있다.



[그림 3] 교체 핵연료 선정 시스템 결과 화면



[그림 4] pre-simulation 수행 결과 화면

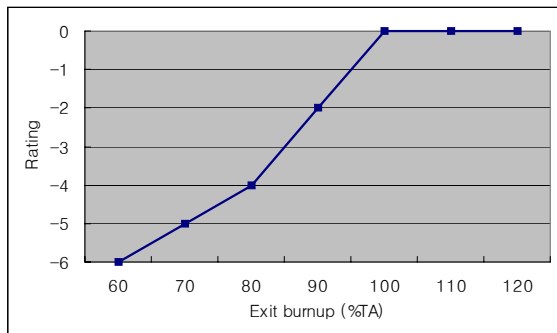


[그림 5] 개별 평가 항목 및 종합 평가 항목의 가중치 변경 화면

### 3. 결과

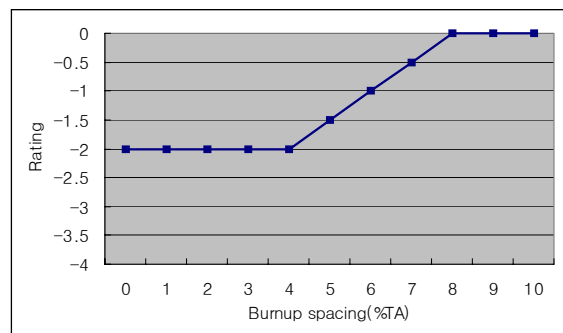
교체 핵연료 선정 시스템을 검증하기 위하여 두 가지 방법으로 테스트하였다. 첫 번째 방법은 교체 핵연료 선정 시스템의 수행 결과를 월성 1호기의 실제 핵연료 교체 내역과 비교하는 것이고, 두 번째 방법은 교체 핵연료 선정 시스템에서 제시하는 핵연료들을 교체하는 것으로 하여 pre-simulation을 연속으로 수행하여 최대 출력이 운영기술지침서를 만족하는지 여부를 검토하는 것이다.

본 시험에서 사용된 개별 평가 규칙 및 종합 평가 규칙의 항목은 [표 1]에 나열된 것과 같으며, 각각에 해당하는 가중치 함수는 [그림 6]~[그림 16]에 제시하였다.



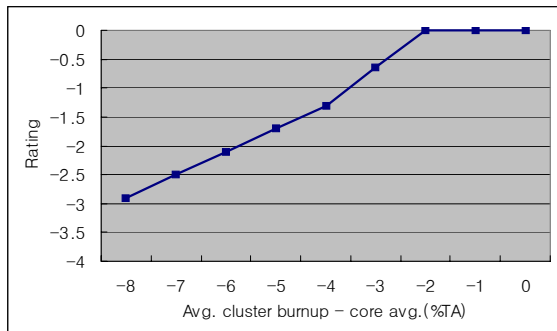
[그림 6] 개별 평가 항목 #1

Channel average exit burnup(%TA)



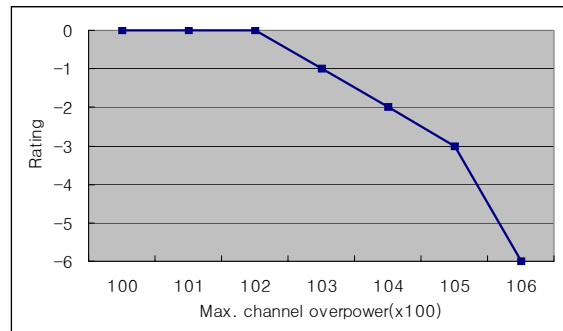
[그림 7] 개별 평가 항목 #2

Exit burnup spacing with near neighbours



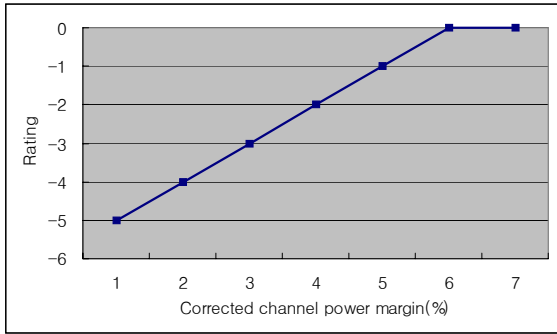
[그림 8] 개별 평가 항목 #3

Cluster average exit burnup difference with core average

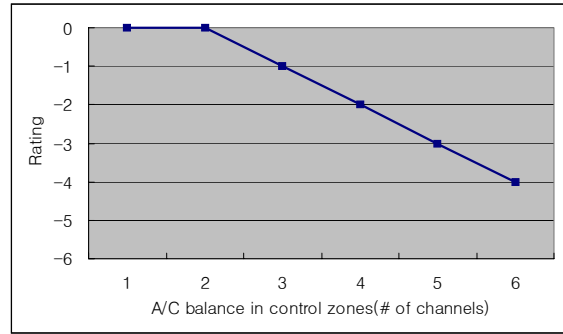


[그림 9] 개별 평가 항목 #4

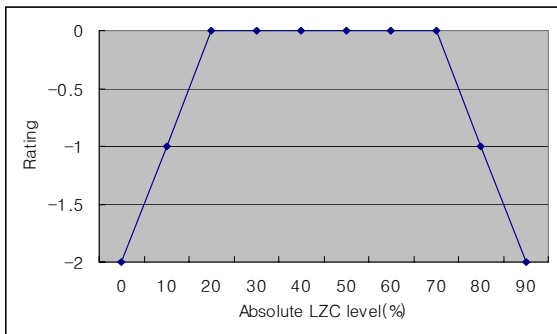
Maximum channel overpower of near neighbors



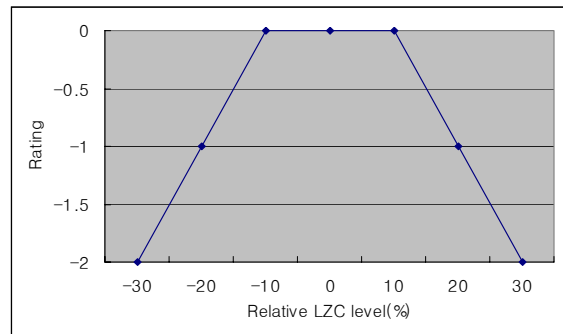
[그림 10] 개별 평가 항목 #5  
Minimum channel power margin of near neighbors



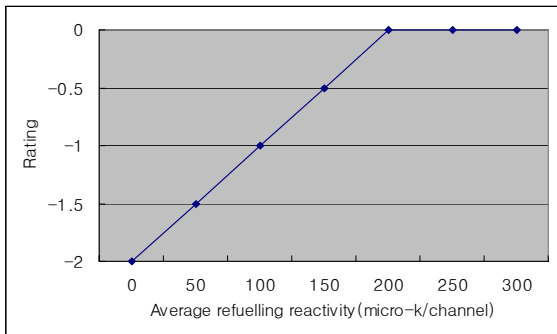
[그림 11] 개별 평가 항목 #6  
A/C balance of channel refuelings



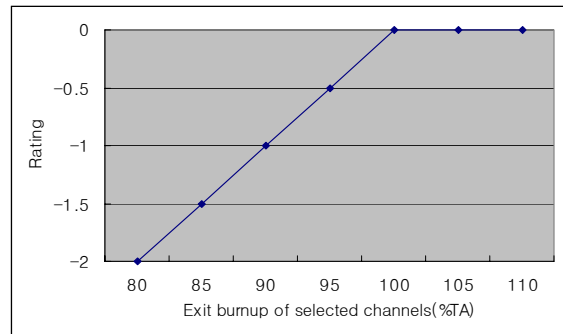
[그림 12] 종합 평가 항목 #1  
Absolute level of  $LZC_i(i=1,14)$



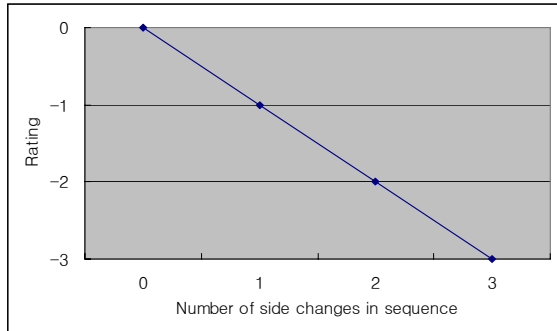
[그림 13] 종합 평가 항목 #2  
Relative level of  $LZC_i(i=1,14)$



[그림 14] 종합 평가 항목 #3  
Average refueling reactivity



[그림 15] 종합 평가 항목 #4  
Exit burnup of selected channels



[그림 16] 종합 평가 항목 #5  
Number of refueling side changes

### 3.1 월성 1호기의 실제 교체 내역과 비교

현재 월성 원자력발전소에서는 1호기를 대상으로 RFSP를 이용한 post-simulation을 주2회(매 주 월,목요일 08시) 수행하고 있으며, 본 테스트에 사용된 자료는 이 중 2003년 3월 26일부터 5월 1일까지 12회에 걸쳐 수행된 post-simulation 결과들이다. 본 테스트는 교체 후보 핵연료들에서 교체 핵연료 집합을 선정하는 방법을 조합, 순열, GA로 설정하여 같은 데이터에 대하여 세 번씩 수행하였으며, GA 수행 조건은 [표 2]와 같다.

[표 2] GA 수행 조건

교차방법	1점교차
종료조건	해의 동질성 70% 이상
변이	적용하지 않음
해집단의 크기	100
세대차	0.2
선택방법	품질비례룰렛휠방법(적합도 k=4)

본 테스트의 수행 결과, 월성 1호기의 실제 교체내역과 교체 핵연료 선정 시스템이 제시하는 교체 핵연료들과는 상이한 부분이 많은 것으로 나타났다.([표 3] 참조) 이는 교체 핵연료 선정 규칙의 각 항목 및 그에 적용한 가중치 함수들은 일반적인 개념에 의해 정의된 반면, 실제 교체된 핵연료를 선정하는 기준에 있어서는 숙련된 노심관리 엔지니어의 경험에 의해 월성 1호기의 독특한 성질들이 충분히 반영되었기 때문으로 해석할 수 있다. 따라서 교체 핵연료 선정 시스템을 월성 1호기에 적용하기 위해서는 오랜 기간의 테스트를 통하여 각 평가 항목을 추가/삭제하거나 가중치 함수를 변경하는 등의 튜닝 작업이 필요하다.

교체 후보 핵연료들에서 교체 핵연료 집합을 뽑아내는 방법론에 따른 결과는 어느 정도 일치하는 것으로 나타났다.([표 3] 참조) 조합으로 수행한 결과와 순열로 수행한 결과는 핵연료들의 교체 순서만 차이 날 뿐, 교체 대상 핵연료 자체는 일치하는 경우가 많았다. 조합 및 순열로 수행한 결과와 GA로 수행한 결과 역시 비슷하게 나타났다. 특히 교체 핵연료의 개수가 3개 이하인 경우는 대부분 일치하였다. 교체 후보 핵연료들에서 교체 핵연료 집합을 뽑아내는 방법론에 따라서는



결과에 특별한 차이가 나타나지 않으므로, 계산 시간이 빠른 방법을 선택하는 것이 타당할 듯하다. 계산 시간에 있어서는 조합의 경우 5개를 추출할 때 최대 13초까지 나타나 별 무리가 없다. 그러나 순열의 경우는 계산시간이 3분 이상으로 기록되므로, 교체 핵연료의 개수가 많은 경우에는 바람직하지 않다. GA의 경우는 계산시간이 대부분 30초 내외로 나타난다. 계산시간이 0초인 경우도 몇 가지 나타나는데, 이는 해집단이 빨리 수렴되어 종료조건에 도달하는 과정이 빠르게 진행되었기 때문이다.

[표 3] 최적 교체채널 선정모델 수행 결과

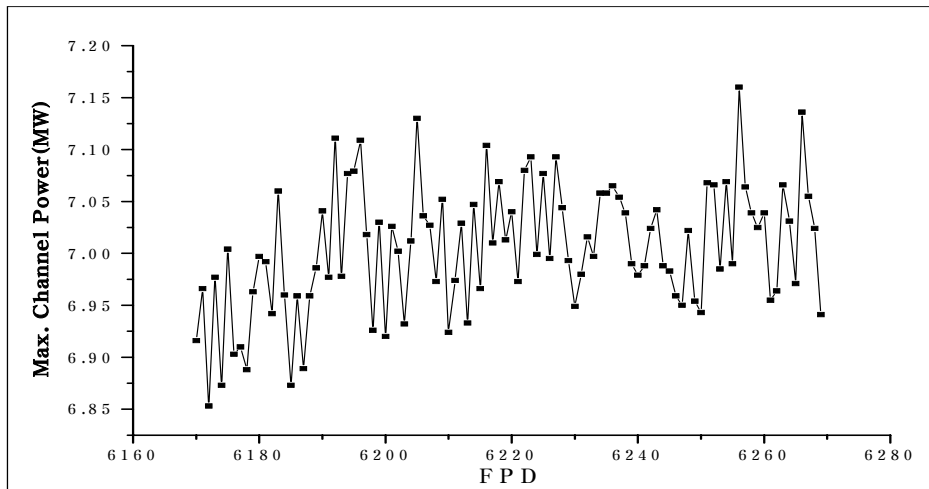
교체채널추출자료		실제 교체내역		combination		permutation		GA	
SDATE	EDATE	교체채널	날짜	교체채널	계산시간	교체채널	계산시간	교체채널	계산시간
03-24	03-26	J09	0	A09	0:00:01	L21	0:00:01	J09	0:00:28
		J21	0	J09		J09		G21	
		P07	0	L21		A09		A09	
		G07	1	D14	0:00:03	W13	0:00:15	P07	0:00:01
		O20	1	F04		E04		E04	
		D14	1	P07		V16		V16	
		U08	1	W13		P07		W13	
03-26	03-31	M14	0	A09	0:00:03	W13	0:00:18	W13	0:00:00
		P15	0	F04		E04		E04	
		J04	0	P15		A09		P15	
		E10	0	W13		P15		A09	
		O10	2	E10	0:00:02	O01	0:00:03	O01	0:00:27
		G17	2	J18		V16		J18	
		N05	2	O01		J18		V16	
		T14	2	V16		E10		E10	
		F04	3	N05	0:00:00	N05	0:00:00	N05	0:00:21
H14	3	T12		T12		T12			
03-31	04-01	K13	0	K13	0:00:00	K13	0:00:00	K13	0:00:33
		O03	0	V16		V16		V16	
04-01	04-03	L21	0	A09	0:00:13	L21	0:05:59	A09	0:00:33
		Q09	0	H09		A09		L21	
		H09	0	K21		W13		H09	
		T16	0	T12		T12		Q09	
		C16	0	W14		H09		W13	
04-03	04-07	J02	0	B07	0:00:03	W13	0:00:17	O01	0:00:30
		T12	0	O01		V16		B07	
		M16	0	V16		B07		W13	
		D12	0	W13		O01		V16	
		M12	1	A10	0:00:01	M16	0:00:05	G21	0:00:26
		T05	1	F03		W09		M16	
		J06	1	G21		E04		A10	
J20	1	M16		B11		W09			
04-07	04-10	Q14	0	B07	0:00:00	V16	0:00:00	V16	0:00:38
		M06	0	V16		B07		O01	
		E14	1	B11	0:00:07	M18	0:03:30	O11	0:00:30
		O11	1	J08		W13		B07	
		F05	1	O01		C14		M18	
		M18	1	O11		O01		A09	
		T07	1	W13		O11		A11	

		T17	2	E06	0:00:00	S06	0:00:23	W13	0:00:29
		K09	2	H17		M06		C14	
		B11	2	M18		D04		V13	
		P04	2	R05		A10		M06	
		H15	2	S06		H17		D04	
04-10	04-14	P18	1	E04	0:00:00	P16	0:00:00	B07	0:00:32
		G08	1	P16		E04		P16	
04-14	04-17	S10	0	B07	0:00:00	B07	0:00:00	W09	0:00:33
		K12	0	V16		W09		V16	
		K21	0	W09		V16		B07	
		F11	1	G21	0:00:01	G21	0:00:01	G21	0:00:27
		N04	1	O01		O01		W13	
		V16	1	W13		W13		O01	
04-17	04-21	P16	0	F03	0:00:00	P16	0:00:00	P16	0:00:34
		O01	0	P16		F03		F03	
		R12	2	B07	0:00:00	H17	0:00:00	O07	0:00:32
		J18	2	H17		B07		A10	
		D11	2	O07		O07		H17	
04-21	04-23	P09	0	E04	0:00:00	E04	0:00:00	W13	0:00:35
		K03	0	O07		O07		O07	
		C14	0	W13		W13		E04	
		L15	1	A09	0:00:00	G19	0:00:00	A09	0:00:29
		E04	1	A11		A09		G19	
		U13	1	G19		B07		A11	
04-23	04-28	N20	0	N20	0:00:00	N20	0:00:01	O07	0:00:00
		O12	0	O07		O07		W13	
		H06	0	W13		W13		W09	
		A09	2	A10	0:00:01	M11	0:00:02	J05	0:00:30
		R05	2	B07		W09		H18	
		K10	2	M11		B07		A09	
		F16	2	W09		A10		A10	
		R18	3	H18	0:00:00	H18	0:00:00	M11	0:00:26
04-28	05-01	B07	0	B07	0:00:01	H17	0:00:00	O07	0:00:28
		O07	0	H17		O07		B07	
		N17	0	O07		B07		H17	
		H13	1	D04	0:00:01	V09	0:00:02	N17	0:00:27
		L06	1	N17		V13		V09	
		U15	1	V09		N17		V13	
		G19	1	V13		D04		D04	
		V09	2	A11	0:00:00	A11	0:00:02	L06	0:00:27
		N09	2	G12		L06		G12	

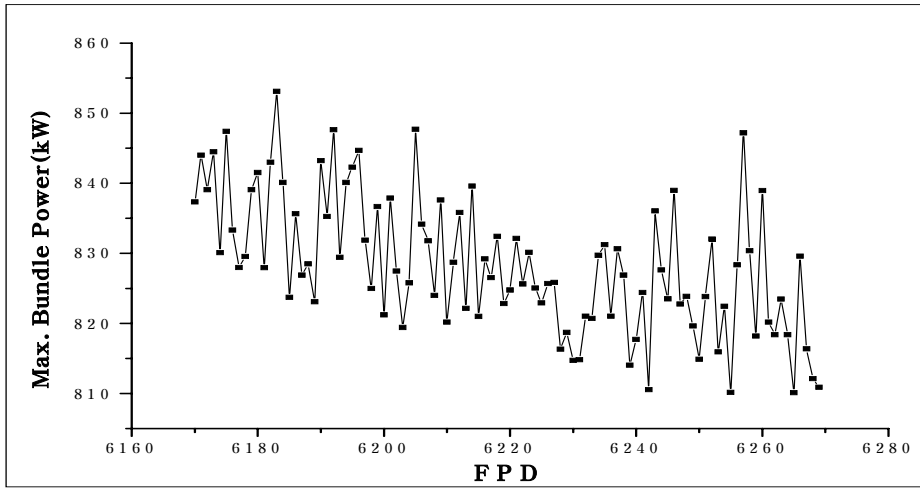
### 3.2 핵연료 교체 pre-simulation 연속수행을 통한 검증

핵연료 교체 pre-simulation 연속 수행을 통한 교체 핵연료 선정 시스템 검증은 현재 운전 중인 월성 1호기 노심을 대상으로 하여 수행되었다. 6170FPD(2003. 3. 24 08:00) 시점을 기준으로 RFSP를 수행한 결과에서 교체 핵연료 선정에 필요한 자료들을 추출하여 pre-simulation을 수행하였으며, zone별 상대 증성자속은 평형노심을 기준으로 하지 않고 전 단계의 상대 증성자속을 사용하였다. 이는 본 pre-simulation이 평형 노심을 기준으로 수행하는 것이 아니라 운전 중인 현 노심상태를 기준으로 수행하였기 때문이다.

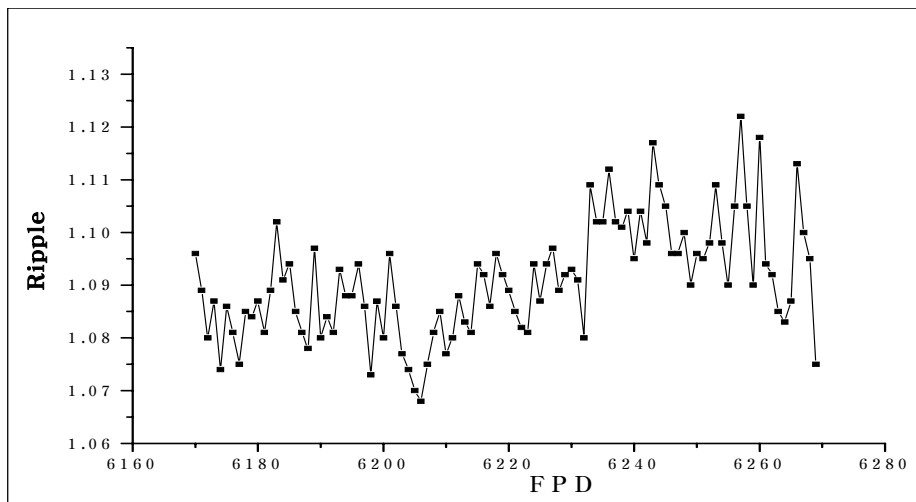
[그림 17]~[그림 21]은 6170FPD에서 6270FPD까지 100 FPD 동안 교체 핵연료 선정 시스템을 연속 수행한 결과이다. [그림 17]은 본 테스트 기간 동안의 최대 채널 출력의 변화를 나타내고 있다. 이 그림을 살펴보면 최대 채널 출력이 약간씩 증가하는 추세를 보이고 있으며 최대채널 출력이 7.17 MW를 상회하는 시점도 나타나고 있음을 알 수 있다. 이는 교체 핵연료 선정시 출력 분포의 평탄화에 대한 비중치를 조정할 필요가 있음을 나타낸다. [그림 18]은 본 테스트 기간 동안의 최대 번들 출력의 변화를 나타내고 있다. [그림 17]에서의 최대 채널 출력은 약간씩 증가하는 경향을 보이는 반면, [그림 18]에 나타난 최대 번들 출력은 약간씩 감소하는 추세를 보이고 있다. 또한 6220 FPD까지는 최대 출력을 가지는 채널의 위치와 최대 출력을 가지는 번들의 위치가 일치하거나 근접해 있었지만 시간이 경과할수록 최대 출력을 가지는 채널의 위치와 최대 출력을 가지는 번들의 위치가 많이 떨어져 있었다. 이는 교체 채널 선정에 따른 출력 분포가 축방향으로도 평형노심의 출력 분포에 비해 뒤틀림이 심해지고 있음을 나타낸다. [그림 19]는 본 테스트 기간 동안의 RIPPLE의 변화를 나타내고 있다. 이 그림에서는 최대 RIPPLE이 약간씩 증가하는 추세를 보이고 있다. 이는 교체 핵연료 선정에 따른 출력 분포가 평형노심의 출력 분포에 비해 편차가 심해지고 있음을 나타낸다. [그림 20]은 본 테스트 기간 동안의 잉여반응도의 변화를 나타내고 있다. 이 그림에서는 잉여반응도가 3.33 mk 정도에서 유지되다가 6260 FPD 정도에서 급격히 감소하는 추세를 보이고 있다. 이는 6260 FPD 이후 교체 핵연료 선정 시스템에서 충분한 반응도 보상이 가능한 핵연료들을 선정하지 못함을 나타낸다. [그림 21]은 본 테스트 기간 동안의 평균 LZC 수위의 변화를 나타내고 있다. 이 그림에서는 평균 LZC 수위가 감소하는 추세를 보이다가 6255 FPD 정도에서 최저 임계 수위(0.05)에 도달하였다. 이는 [그림 20]에서 나타난 바와 같이 선정된 교체 채널이 노심 내에 충분한 반응도를 제공 하지 못한 결과 이를 보상하기 위하여 수위가 내려감을 뜻한다.



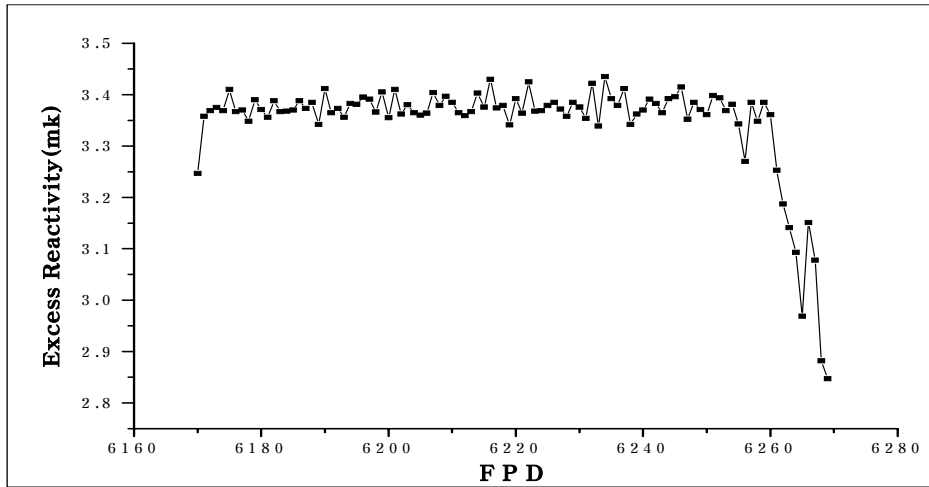
[그림 17] 검증 기간동안의 최대채널출력 변화(6170-6270 FPD)



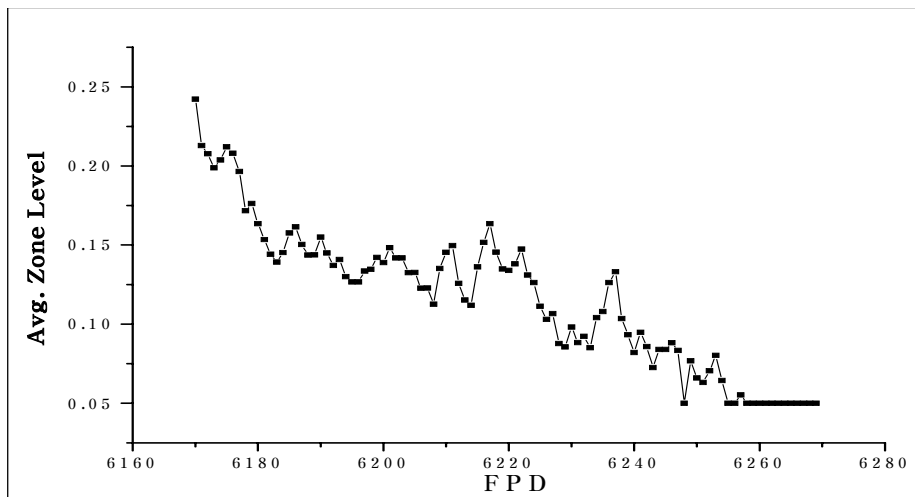
[그림 18] 검증 기간동안의 최대번들출력 변화(6170-6270 FPD)



[그림 19] 검증 기간동안의 최대 RIPPLE 변화(6170-6270 FPD)



[그림 20] 검증 기간동안의 최대 잉여반응도 변화(6170-6270 FPD)



[그림 21] 검증 기간동안의 평균 LZC 수위 변화(6170-6270 FPD)

#### 4. 결론

본 연구에서는 보다 효율적인 원전 운영을 지원하고자 하는 목적으로 교체 핵연료 선정 시스템을 개발하였다. 교체 핵연료 선정 시스템은 노심 관리의 중요한 업무로 인정되는 교체 핵연료 선정 과정을 체계화한 것으로서, 교체 핵연료 선정 규칙과 원전 운영 과정에서 축적된 데이터베이스를 활용하여 사용자에게 교체 가능한 핵연료 집합을 우선순위별로 선정하여 제시한다. 이는 또한 선정된 교체 핵연료를 검증하기 위해 CANDU 노심 감시 시스템과 연계된 pre-simulation 기능을 포함하고 있다.

교체 핵연료 선정 시스템을 검증하기 위해 수행 결과를 월성 1호기 실제 교체내역과 비교한

결과 상이한 점을 발견할 수 있었다. 이는 교체의 타당성을 평가하는 기준의 차이에 기인한 것으로, 비교적 주관적인 판단 근거를 객관적, 일반적인 교체 핵연료 선정 규칙으로 전환하는 과정에서 발생한 것이다. 또한 핵연료 교체 pre-simulation 연속 수행에서는 본 시스템의 수행 결과를 핵연료 교체에 연속적으로 적용하고 그 결과를 살펴봄으로써 월성 1호기에 적합한 평가 항목들에 관한 정보를 수집할 수 있었다.

향후 핵연료 선정 규칙의 각 평가 항목들을 검증하고 조절하는 과정을 거쳐 본 시스템을 월성 1호기에 적용하면 그동안 오랜 시간과 번거로운 자료수집, 분석, 사용자의 경험 및 의지 등을 필요로 했던 교체 핵연료 선정 과정을 보다 체계적이고 효율적으로 수행할 수 있으리라 기대된다.

## 5. 참고문헌

1. H. Choi, A.S. Gray, "The Application of an Auto-Refueling Method for CANDU 6", Mathematics and computations, reactor physics, and environmental analyses, pp.635-644, 1995
2. "Auto-Refueling Simulation for CANDU 6", Proceedings of the Korean Nuclear Society Spring Meeting, Vol.1, pp.51-57, 1995
3. D. Brissette, "New Selection Criteria for Channel Refueling of a CANDU-6 Reactor : Introduction to Floppy Rules", International Conference on CANDU Fuel, September, 2001
4. M. Y. Yoon, et al., "Computer Based Core Monitoring System for an Operating CANDU Reactor", Journal of the Korean Nuclear Society, Vol.36(1), pp.53-63, February, 2004
5. M. Y. Yoon, et al., "A Data Modeling for Implementation of on-line Power Monitoring System in an Existing CANDU Core", Korean Society for Energy Engineering Annual Autumn Meeting, November, 2002
6. 염충섭 외, "CANDU 노심 운전지원시스템 개발", P2065-04-MM-04.01, 고등기술연구원, 2004

## 감사의 글

본 연구는 과학기술부 원자력중장기사업 중 중수로 운전성능 향상기술 개발의 일환으로 한국전력연구원의 위탁연구로서 수행되었습니다. 지원에 감사드립니다.